تاثیر افزودن نیکل بر ریزساختار و قابلیت شیشه سازی آلیاژ آمورف حجمی Fe-Mo-P-C-B *

مقاله علمی – پژوهشی

مهسا انصاری‌نیا[۱]   امیر سیف‌الدینی[۲]   سعید حسنی[۳]   سید صادق قاسمی بنادکوکی[٤]

چکیده

در تحقیق حاضر تاثیر افزودن نیکل بر قابلیت شیشه‌ای شدن آلیاژ کامپوزیتی FeMoPCB بررسی و مقدار بهینه آن تعیین شد. سپس پایداری حرارتی این آلیاژ در حضـور مقادیر مختف نیکل با اسـتفاده از آزمون‌های تجربی ،گرماسـنجی روبشـی تفاضـلی، الگوی پراش پرتو ایکس، مشـاهدات نوری و میکروسـکوپ الکترونی عبوری و روش‌های محاسـباتی مانند معیارهای α، β، γ و... بررسـی شـد. نتایج آزمون XRD، TEM نشـان داد که با افزودن ۱۰ درصد اتمی نیکل قابلیت شیشه‌ای شدن آلیاژ فوق افزایش می‌یابد و در درصدهای دیگر نیکل فازهای بلوری مختلفی شناسایی شدند. حضور فازهای بلوری با استفاده از آزمون سختی سنجی نیز بررسی شد. در نهایت مشخص شد که بدون در نظر گرفتن نتایج تجربی، نتایج روش‌های محاسباتی از دقت لازم برخوردار نیست.

واژهای کلیدی شیشه‌فلزات حجمی، فاز کریستال، قابلیت شیشه‌ای شدن، نیکل.

The Effect of Ni Addition on the Microstructure and Glass Forming Ability of Fe-Mo-P-C-B Bulk Amorphous Alloy

M.Ansariniya   A.Seifoddini   S.Ghasemi-Banadekoki   S.Hasani

Abstract

In this work, the effect of Ni addition on the glass forming ability (GFA) of FeMoPCB composite alloy was investigated and the optimal amount of Ni to improve GFA was determined. So, the thermal stability of this alloy with the various percent of nickel was investigated by not only experimental methods including; differential scanning calorimetry, X-ray diffraction, optical microscope and transmission electron microscopy but also computational methods such as γ ،β ،α and etc. The results of XRD test, TEM showed that in the presence of 10 at.% nickel , the glass-forming ability of this alloy increased, while in the presence of lower or higher percent nickel, different crystalline phases were detected. The presence of crystalline phases was also investigated by microhardness test. Finally, it was found that the results of the computational methods regardless of the experimental results don’t have enough accurate .

Key Words Bulk metallic Glasses (BMGs), Crystal phase, Glass forming ability, Nickel.

* تاریخ دریافت مقاله۹۶/٦/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۹٦/۱۱/۲۳ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشگاه یزد.

(۲) نویسنده مسئول: استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد.

(۳) استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد.

(٤) دانشیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد.

Email: seifoddini@yazd.ac.ir

DOI: 10.22067/ma.v31i2.67248

مقدمه

شیشه فلزات حجمی (BMGs) فلزات جامد غیربلوری هستند که دارای ضخامتی حداقل برابر ۱ mm هستند که در نتیجه سرد کردن پیوسته از حالت مذاب تولید می‌شوند [1-3] این دسته از مواد، پایداری ترمودینامیکی پایینی داشته و در مقابل گرما تمایل به تبلور دارند [٤،٥]. در میان آلیاژهای شیشه‌ای حجیم، آلیاژهای پایه آهن به علت در دسترس بودن و قیمت ارزان مواد اولیه و همچنین ارائه مجموعه‌ای از خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی منحصر به فرد مانند استحکام و سختی بالا، مقاومت به خوردگی خوب و خواص مغناطیسی نرم مطلوب مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است [6-9]. از این رو در طی سال‌های اخیر افزایش قابلیت شیشه‌ای شدن (GFA) و ارتقاء خواص مکانیکی و مغناطیسی آلیاژهای شیشه‌ای پایه آهن اهمیت بالایی پیدا کرده است. در این بین عمده ضعف آلیاژهای شیشه‌ای پایه آهن تردی و قابلیت تغییر شکل پلاستیک پایین آن‌ها در دمای اتاق است که کاربردشان را در اغلب موارد مهندسی با مشکل مواجه کرده است [10-12]. یکی از راهکارهایی که برای بهبود انعطاف‌پذیری این آلیاژها استفاده می‌شود افزایش باندهای برشی در طول نمونه است [13,14]. به این منظور یا از عناصر فلزی با نسبت پواسون بالا استفاده می‌شود و یا عناصر آلیاژی متفاوتی به سیستم اضافه می‌شود به نحوی که قابلیت شیشه‌ای شدن و دیگر خواص این آلیاژها را تغییر ندهد [15-17]. محققین متعددی تاثیر حضور عناصر آلیاژی مختلفی همچون بور [18]، مولیبدن [19]، نیکل [20] و ... را مورد مطالعه قرار داده‌اند. به عنوان مثال نتایج بررسی‌های Guo و همکارانش [6] نشان داد که در حضور عنصر B انعطاف‌پذیری آلیاژ $Fe_{77}Mo_5P_9C_{7.5}B_{1.5}$ تا حدود ٤٠٪ افزایش می‌یابد. در بین این عناصر، عنصر نیکل آنتالپی انحلال منفی کمتری با آهن نسبت به عناصری مانند فسفر، کربن و بور دارد که موجب کاهش فعل و انفعالات بین اتمی می‌شود و در نتیجه پلاستیسیته بهبود می‌یابد [9]. همچنین در گزارش‌های مختلفی تاثیر مثبت نیکل در بهبود قابلیت شیشه‌ای شدن و پلاستیسیته سیستم‌های آلیاژ شیشه‌ای حجمی پایه آهن همچون $(Fe_{0.8}Ni_{0.2})_{71}Mo_5P_{12}C_{10}B_2$ [14] و $Fe_{37}Co_{20}Ni_{15}B_{19.2}Si_{4.8}Nb_4$ [21]، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین سیف‌الدینی و همکارانش [11] با انجام مطالعات فازشناسی نشان دادند که افزودن نیکل تا میزان ۱۰ درصد اتمی به سیستم آلیاژی $(Fe_{1-x}Ni_x)Mo_5P_9C_{7.5}B_{1.5}$ (x= 0.1)، موجب افزایش قابلیت شیشه‌ای شدن می‌شود و در نتیجه آن توانستند یک آلیاژ کاملاً آمورف را تا حداکثر قطر ۲ mm تولید کنند. همچنین نتایج این بررسی نشان داد که این میزان نیکل تاثیر بسزایی در افزایش انعطاف‌پذیری دارد به گونه‌ای که در حضور ۱۰ درصد اتمی نیکل انعطاف‌پذیری آلیاژ تا حدود ۸/۵ درصد افزایش یافت. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که در پژوهش فوق تنها با استفاده از آزمون فشار، خواص مکانیکی آلیاژ مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر سعی شد تا با افزودن نیکل، در نمونه ریختگی با قطر ۲ mm، قابلیت شیشه‌ای شدن و تاثیر حضور عنصر آلیاژی بر سختی آن مورد بررسی قرار گیرد. همچنین به منظور بررسی قابلیت شیشه‌ای شدن آلیاژ $(Fe_{1-x}Ni_x)Mo_5P_9C_{7.5}B_{1.5}$ (x=0.05, 0.1, 0.15) پارامترهای شیشه سازی نظیر T_{rg} ، γ ، ω و ... محاسبه و بررسی شد. و در نهایت در بخشی از این پژوهش، رفتار حرارتی و ریزساختار آلیاژ مورد نظر، به ترتیب با استفاده از دستگاه گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مورد بررسی قرار گرفتند.

مواد و روش انجام پژوهش

شمش‌های اولیه آلیاژ شیشه‌ای پایه آهن $(Fe_{1-x}Ni_x)Mo_5P_9C_{7.5}B_{1.5}$ (x=0.05, 0.1, 0.15) با ترکیب شیمیایی اسمی مطابق جدول (۱) از مواداولیه با خلوص بالا (۹۹/۹۹) و به روش ذوب القایی در لوله‌ی آلومینا و تحت گاز آرگون با خلوص ۹۹/۹۹۹۹ درصد آماده شدند. لازم به ذکر است که عناصری که تلفات جرمی حین ذوب داشتند مانند فسفر و کربن، ابتدا به صورت فروآلیاژ $Fe_{83}P_{17}$ و $Fe_{83}C_{17}$ در آمده و سپس با نسبت معین در ترکیب آلیاژ استفاده شد. مذاب در درون قالب مسی (بدون آبگرد) به صورت شمش استوانه‌ای با قطر ۱۲ mm ریخته‌گری شد. در طول فرایند ذوب دمای مذاب توسط پیرومتر کنترل و ریخته‌گری در فوق ذوب ۱۵۰ °C انجام شد. ریخته‌گری به روش تزریقی (با اختلاف فشار ۲۵۰ mbar) داخل قالب مسی

آبگرد، به شکل میله‌هایی با قطر ۲ و طول ۶۰ mm انجام گردید. دماهای بحرانی نمونه شامل دمای شیشه‌ای شدن (T_g)، دمای تبلور (T_x)، دمای ذوب (T_{liq}) و دمای تشکیل فازهای بلوری توسط دستگاه گرماسنجی روبشی تفاضلی (Perkin Elmer, DSC-7) تحت گاز خالص آرگون با نرخ گرمایش ۲۰ °C/min تعیین شد. برای بررسی میزان شیشه‌ای شدن و بررسی تحولات فازی نمونه‌ها بعد از ریخته‌گری از آزمون پراش پرتو ایکس (XRD, XPERT- PRO) استفاده شد. نتایج آزمون با استفاده از پرتویی با طول موج Co-kα (λ=0.1789 nm) به دست آمد. علاوه بر این موضوع و به دلیل حساسیت نسبتاً پایین روش XRD برای تایید شیشه‌ای بودن ساختار آلیاژ از میکروسکوپ الکترونی عبوری با قدرت تفکیک بالا (HRTEM, Tecnai F30 operating at 300 kV) نیز استفاده شد. همچنین به منظور اندازه‌گیری میکروسختی از دستگاه HelmholtzstraBe 20 و میزان بار ۲ N استفاده شد.

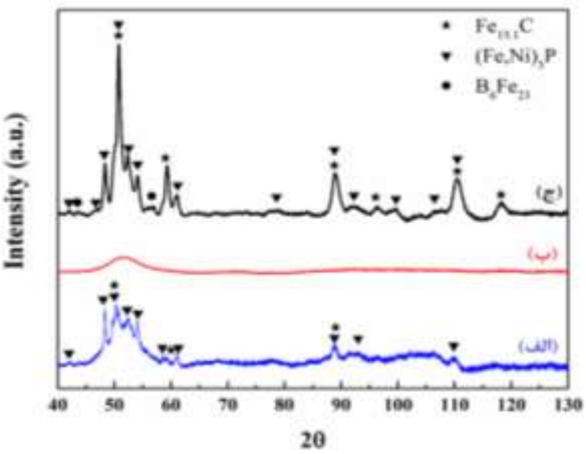
جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ شیشه‌ای حجمی مورد بررسی در پژوهش حاضر

Element (at.%)	Fe	Mo	P	C	B	Ni
x =0.05	73.15	5	9	7.5	1.5	3.85
x =0.1	69.3	5	9	7.5	1.5	7.7
x =0.15	65.45	5	9	7.5	1.5	11.55

نتایج و بحث

بررسی‌های فازشناسی

شکل (۱) الگوی پراش پرتو ایکس آلیاژهای ($Fe_{1-x}Ni_x$)$Mo_5P_9C_{7.5}B_{1.5}$ (x=0.05, 0.1, 0.15) را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در الگوهای مربوط به آلیاژهای حاوی ۵ و ۱۵ درصد اتمی نیکل، تعدادی پیک تیز روی یک پیک پهن وجود دارند که بیانگر یک ساختار کامپوزیتی آمورف–بلور است. پیک‌های موجود در الگوهای پراش در نمونه حاوی ۵ درصد اتمی نیکل مربوط به فازهای بلوری $(Fe,Ni)_3P$ و $Fe_{15.1}C$ و در نمونه حاوی ۱۵ درصد اتمی نیکل مربوط به B_6Fe_{23}، $(Fe,Ni)_3P$ و $Fe_{15.1}C$ می‌باشند. این در حالی است که در آلیاژ حاوی ۱۰ درصد اتمی نیکل تنها یک پیک پهن مشاهده می‌شود که از مشخصه‌های ساختار آمورف است و همین امر نشان دهنده قابلیت شیشه‌ای شدن بیشتر در آلیاژ حاوی ۱۰ درصد اتمی نیکل می‌باشد. نتایج بررسی محققین در این زمینه نشان می‌دهد که افزایش میزان نیکل تا ۱۰ درصد اتمی، منحنی C شکل تبلور را به سمت راست و دماهای پایین‌تر منتقل می‌کند و از این رو نرخ بحرانی سرمایش کاهش و به دنبال آن GFA افزایش می‌یابد [22]. در مقادیر بیشتر نیکل (x=15) شکل‌گیری فازهای بلوری موجب کاهش GFA می‌شود. در واقع افزودن نیکل موجب افزایش تعداد اجزاء تشکیل دهنده آلیاژ شده و بنابر اصل درهم ریختگی (Confusion principle) تعداد مولفه‌های بیشتر در یک سیستم آلیاژی باعث عدم پایداری فازهای بلوری که ممکن است حین سرمایش تشکیل شوند، می‌شود؛ افزایش عنصر آلیاژی تا یک حد مشخص موجب افزایش تراکم، چگالی و پایداری مذاب تحت تبرید شده که تمایل آلیاژ به تبلور را کاهش می‌دهد [9,15] و این در حالی است که با افزودن عنصر آلیاژی از آن مقدار مشخص نحوه تاثیرگذاری می‌تواند کاملاً بر عکس شود.

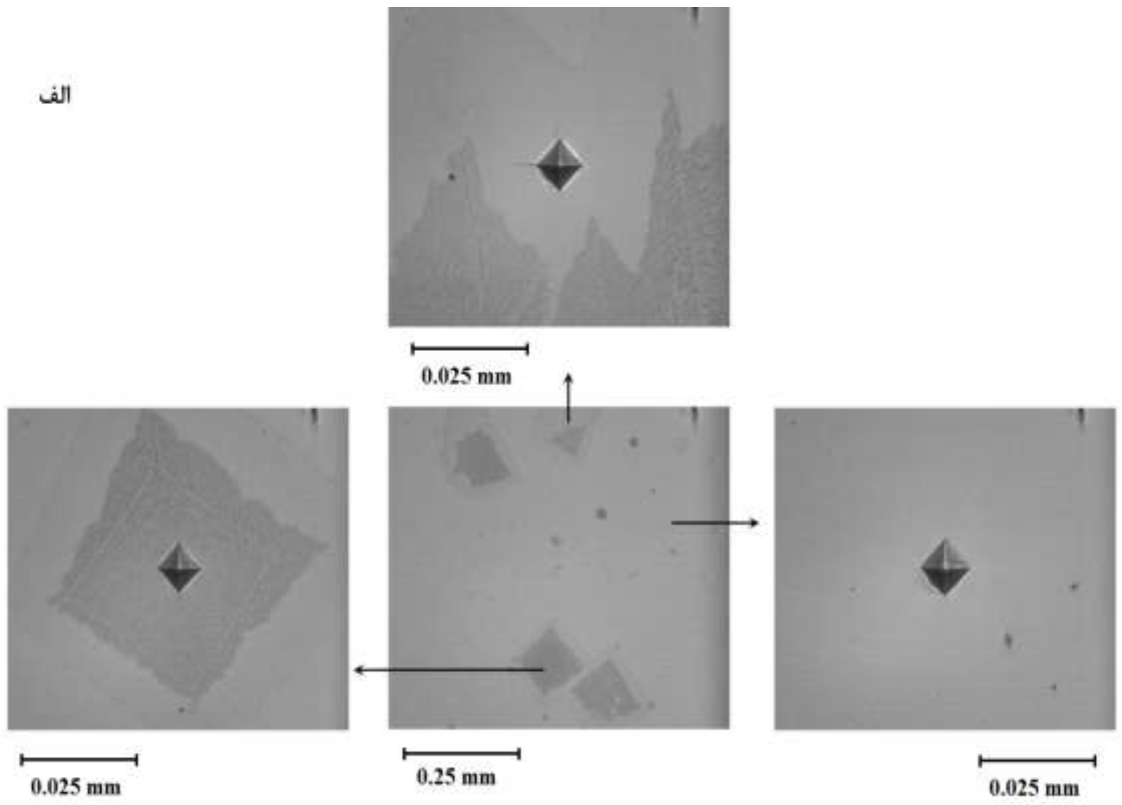


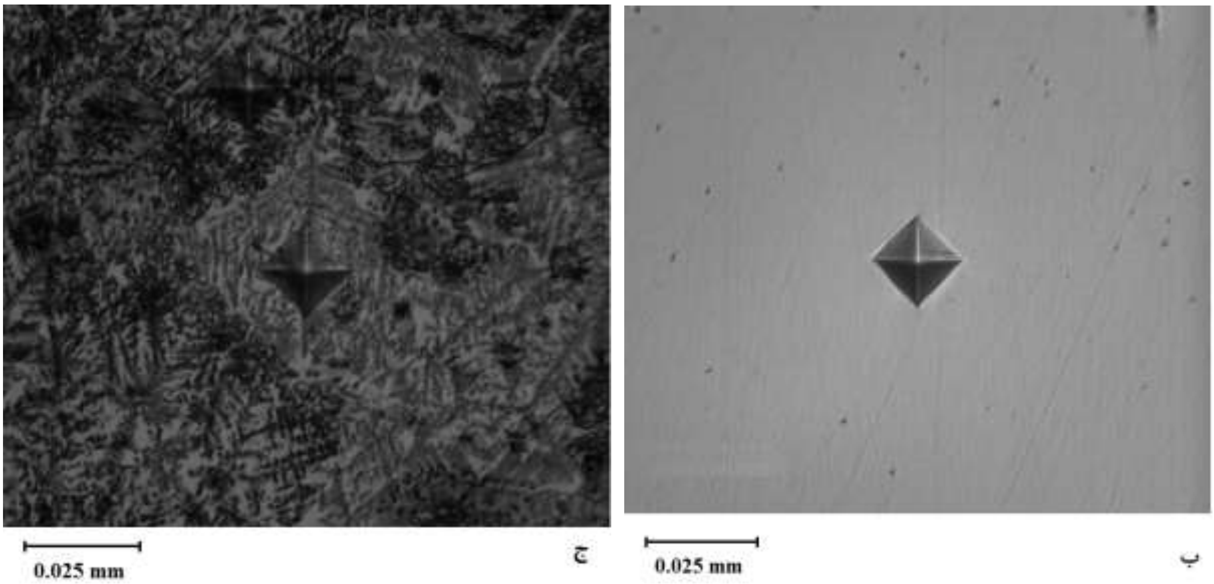
شکل ۱ الگوهای پراش پرتو ایکس مربوط به آلیاژ شیشه‌ای ریختگی حاوی الف) ۵، ب) ۱۰ و ج) ۱۵ درصد اتمی نیکل

بررسی‌های ریزساختاری

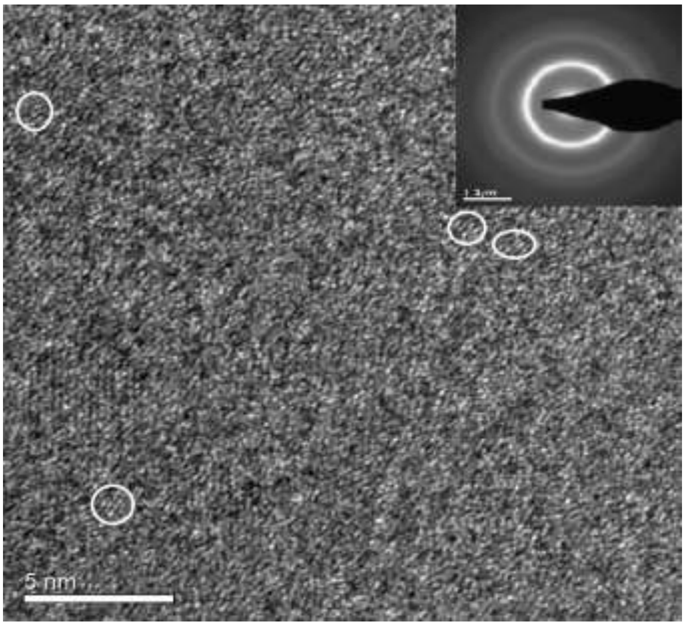
بررسی‌های میکروسکوپ نوری. شکل (۲) تصاویر نوری مربوط به نمونه‌های با درصدهای مختلف نیکل را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود در

تصاویر (۳-الف و ج) به ترتیب مربوط به نمونه‌های حاوی ۵ و ۱۵ درصد اتمی نیکل زمینه آمورف همراه با یک سری فازهای بلوری وجود دارد، به گونه‌ای که در نمونه حاوی ۵ درصد اتمی نیکل، دو نوع فاز بلوری مکعبی شکل در زمینه آمورف وجود دارد و در نمونه با ۱۵ درصد اتمی نیکل نیز رشد چند جهته دندریت‌ها در زمینه مشاهده می‌شود. بر اساس این تصاویر، کسر حجمی فازهای بلوری در این دو نمونه به اندازه‌ای است که در آنالیز XRD نیز قابل شناسایی و مشاهده بوده و این موضوع به خوبی نیز توسط نتایج حاصل از آن مورد تایید قرار گرفت (شکل ۱). این در حالی است که در تصویر (۳-ب) تنها ساختار آمورف مشاهده می‌شود که این موضوع نیز با نتایج حاصل از آزمون XRD تطابق خوبی دارد. به علاوه، روی هر کدام از نمونه‌ها تست میکروسختی ویکرز نیز انجام شده است و اثر ناشی از آن قابل مشاهده است و نتایج حاصل از آنها در جدول (۲) ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، اثر سختی در فازهای بلوری کوچکتر می‌باشد و به عبارت دیگر سختی فازهای بلوری به مراتب نسبت به زمینه بالاتر است که این موضوع با توجه به ماهیت کاربیدی فازهای بلوری نیز قابل انتظار می‌باشد و با نتایج سایر محققین نیز تطابق خوبی دارد [24]. لازم به ذکر است که به دلیل کسر حجمی نسبتاً وسیع فاز بلوری نسبت به زمینه آمورف در نمونه حاوی ۱۵ درصد اتمی نیکل، امکان تعیین سختی فاز زمینه برقرار نشد. از سوی دیگر بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۲)، فاز آمورف در نمونه حاوی ۱۰ درصد اتمی نیکل سختی کمتری نسبت به نمونه حاوی ۵ درصد اتمی نیکل دارد. علت این موضوع را می‌توان به پس زدن عناصر آلیاژی سخت مانند Mo به زمینه و غنی شدن زمینه از این عناصر آلیاژی مانند Mo در نمونه ۵ درصد اتمی نیکل، به دلیل تشکیل فازهای بلوری مانند (Fe,Ni)3P نسبت داد.





شکل ۲ تصاویر نوری از آلیاژ شیشه‌ای ریختگی حاوی الف) ۵، ب) ۱۰ و ج) ۱۵ درصد اتمی نیکل



شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری به همراه الگوی پراش مربوط به آلیاژ حاوی ۱۰ درصد اتمی نیکل

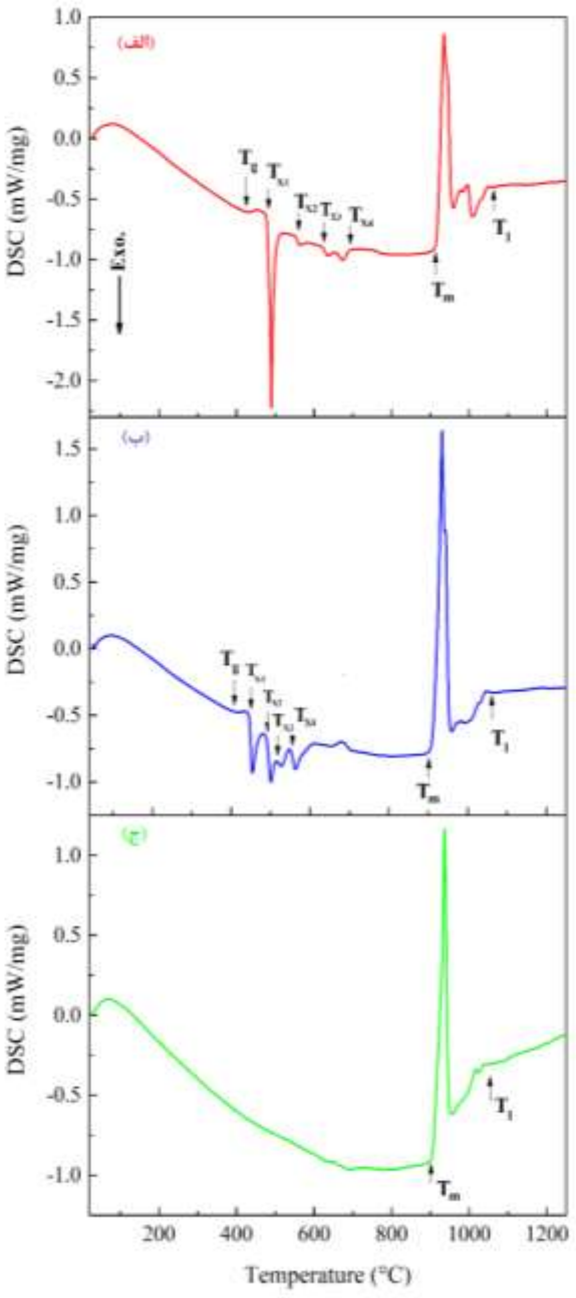
جدول ۲ نتیجه حاصل از آزمون میکروسختی در بخش‌های ریزساختاری مختلف موجود در آلیاژهای مورد بررسی

X	Micro hardness (HV)		
	Matrix	First phase	Second phase
X=0.05	858 ± 15	974 ± 7	1135 ± 10
X=0.1	839 ± 10	-	-
X=0.15	-	783 ± 10	927 ± 20

بررسی‌های TEM. شکل (۳) تصویر TEM به همراه الگوی پراش الکترونی مربوط به نمونه ریختگی حاوی ۱۰ درصد وزنی نیکل را نشان می‌دهد. پراش به صورت حلقه پهن بیانگر ساختار کاملاً آمورف آلیاژ است. علاوه بر این موضوع، حضور مناطق با نظم کوتاه دامنه (SRO) نیز در تصاویر مشخص شده است که از مشخصه‌های ساختار آمورف است [23]. علت شکل گیری مناطق با نظم کوتاه دامنه، سرعت سرمایش بالا و عدم وجود زمان کافی برای نفوذ اتمی و تشکیل ساختارهای منظم بلند دامنه (LRO) در این نوع آلیاژها است [11].

آنالیز حرارتی

شکل (٤) منحنی‌های DSC مربوط به سه آلیاژ ریختگی مورد بررسی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج ارائه شده در این شکل، تاثیر افزودن نیکل به مقادیر مختلف (۵ تا ۱۵ درصد اتمی) به خوبی قابل مشاهده است. در منحنی DSC مربوط به نمونه حاوی ۱۵ درصد اتمی نیکل به جز پیک گرماگیر ذوب پیک دیگری وجود ندارد و این در حالی است که در نمونه حاوی ۱۰ درصد اتمی نیکل، قبل از پیک گرماگیر مربوط به ذوب، به خوبی پیک‌های گرمازای مربوط به تبلور نمونه در حین حرارت‌دهی مشاهده می‌شود که به ترتیب با T_{x1}، T_{x2}، T_{x3} و T_{X4} در شکل مشخص شده است. در منحنی DSC مربوط به نمونه ۵ درصد اتمی نیکل نیز هر چند پیک‌های گرمازایی قبل از پیک ذوب مشاهده می‌شود، اما به گستردگی نمونه حاوی ۱۰ درصد اتمی نیکل نمی‌باشد و این به معنای بلوری بودن بخشی از ساختار این نمونه است که با نتایج XRD و همچنین مشاهدات نوری به خوبی تطابق دارد. علاوه بر موارد فوق، یک پیک کوچک گرماگیر قبل از پیک ذوب در منحنی DSC مربوط به نمونه حاوی ۱۰ درصد اتمی نیکل مشاهده می‌شود که به استحاله آلوتروپیک ارتباط دارد [25]. علاوه بر موارد فوق، به منظور بررسی دقیق‌تر، اطلاعات حاصل از این منحنی‌ها شامل دماهای تبلور، پیک تبلور، شیشه‌ای شدن، آغاز و پایان ذوب در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۳) به خوبی مشاهده می‌شود که با افزایش درصد نیکل تا ۱۰ درصد اتمی، به دلیل تشکیل فاز رسوبی α-Fe و نزدیک شدن ترکیب شیمیایی آلیاژ به ترکیبات یوتکتیک، دمای ذوب کاهش یافته است ولی با افزایش بیشتر آن، مجدداً دمای ذوب افزایش می‌یابد [11].



شکل ٤ منحنی‌های DSC مربوط به آلیاژهای مورد بررسی حاوی الف) ۵، ب) ۱۰ و ج) ۱۵ درصد اتمی نیکل

جدول ۳ پارامترهای حرارتی و دمایی مستخرج از آزمون‌های آنالیز حرارتی

X	T_g	T_X	T_P	T_m	T_l
0.05	424.8	478.5	478.6	903	1051
0.1	401.5	446.3	446.7	894	1057
0.15	-	-	-	890	1047

جدول ٤ روابط مربوط به روش‌های محاسباتی مختلف و مقادیر محاسبه شده با استفاده از آنها برای آلیاژهای مورد بررسی

Criterion/Parameter	Equation	Ref.	X		
			0.05	0.1	0.15
ΔT_x	$\Delta T_X = T_X - T_g$	[29]	53.7	44.8	-
T_{rg}	$T_{rg} = \frac{T_g}{T_L}$	[29]	0.42	0.4	-
γ	$\gamma = \frac{T_X}{(T_g + T_L)}$	[30]	0.33	0.32	-
γ_m	$\gamma_m = \frac{2T_X - T_g}{T_L}$	[26]	0.53	0.49	-
β	$\beta = 1 + \frac{T_X}{T_L} = 1 + \alpha$	[30]	1.47	1.45	-
newβ	$\beta = \frac{T_X \times T_g}{(T_L - T_X)^2}$	[31]	0.72	0.59	-
δ	$\delta = \frac{T_X}{T_L - T_g}$	[30]	0.82	0.75	-
α	$\alpha = \frac{T_X}{T_L}$	[26]	0.47	0.45	-
T_{rx}	$T_{rx} = \frac{T_X}{T_g}$	[26]	1.12	1.11	-
ϕ	$\emptyset = T_{rg}\left(\frac{\Delta T_X}{T_g}\right)^{0.143}$	[32]	0.31	0.29	-
ω	$\omega = \frac{T_g}{T_x} - \frac{2T_g}{T_L + T_g}$	[32]	0.29	0.32	-
K_{gl}	$K_g = \frac{T_x - T_g}{T_m - T_x}$	[31]	0.12	0.1	-

بررسی معیارهای قابلیت شیشه‌ای شدن

به منظور ارزیابی قابلیت شیشه‌ای شدن علاوه بر بررسی‌های تجربی، روش‌های محاسباتی متعددی نیز ارائه شده‌اند که بدین منظور روابط ریاضی پیشنهاد شده‌اند که از دقت قابل قبولی نیز برخوردار می‌باشند. در جدول (٤) فهرستی از این پارامترها به همراه روابط ریاضی مربوط به آنها ارائه شده‌اند. گزارش شده است که از نظر تئوری هرچه مقادیر این پارامترها بیشتر باشد به معنای افزایش قابلیت شیشه‌ای شدن آلیاژ است [26-28]. به عنوان مثال با افزایش منطقه تحت تبرید شده (ΔT_x) میزان پایداری وثبات فاز شیشه بیشتر شده و به عبارتی قابلیت شیشه‌ای شدن افزایش یافته است. در پژوهش حاضر نیز پارامترهای مذکور مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج آن در جدول (٤) مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که به منظور انجام محاسبات از نتایج ارائه شده در جدول (۳) استفاده گردید. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (٤) مشاهده می‌شود که بر خلاف انتظار قابلیت

شیشه‌ای شدن در نمونه حاوی ۵ درصد اتمی نیکل از نمونه ۱۰ درصد اتمی نیکل بیشتر است. این موضوع با نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی مانند XRD و مشاهدات نوری در تناقض است، زیرا در آنها شکل‌گیری فازهای بلوری در نمونه حاوی ۵ درصد اتمی نیکل بر خلاف نمونه حاوی ۱۰ درصد اتمی نیکل به خوبی به اثبات رسیده بود. در نمونه حاوی ۵ درصد اتمی به دلیل شکل‌گیری یک سری فازهای بلوری درصد عناصر موجود در فاز آمورف زمینه نسبت به نمونه حاوی ۱۰ درصد اتمی نیکل متفاوت شده است و این ترکیب متفاوت قابلیت شیشه‌ای شدن بالاتری نسبت به ترکیب عادی دارد و این در حالی است که اطلاعات حاصل از فاز آمورف باقیمانده اصلا معیار خوبی برای کل آلیاژ نمی‌باشد. به عبارت دیگر، روش‌های محاسباتی عمدتاً مبتنی بر اطلاعات مستخرج از پیک‌های تبلور می‌باشند که به آن بخشی از آلیاژ برمی‌گردد که در حین حرارت‌دهی آمورف باقیمانده است، در حالیکه ممکن است بخشی از آلیاژ در حین سرد شدن قبلی متبلور شده باشد. لذا با توجه به این نتایج می‌توان اینگونه استنباط کرد که بررسی قابلیت شیشه‌ای شدن تنها با اتکا به روش‌های محاسباتی و بدون انجام آزمون‌های تجربی از دقت لازم برخوردار نیست

نتیجه‌گیری

در پژوهش اخیر تاثیر حضـــور نیکل بر روی ریزســـاختار، خواص مکانیکی و قابلیت شیشه سازی آلیاژ آمورف حجمی Fe-Mo-P-C-B مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که:

با افزودن درصد نیکل تا حدود ۱۰ درصد اتمی قابلیت شیشه سازی آلیاژ بر اساس نتایج آزمون‌های تجربی افزایش یافت به گونه‌ای که در الگوی پراش پرتو ایکس این نمونه پیک بلوری به چشم نخورد. همچنین به دلیل تشکیل فازهای بلوری غنی از آهن مانند $(Fe,Ni)_3P$، و در نتیجه پس زده شدن عناصر سخت مانند Mo به زمینه، نمونه حاوی ۵ درصد وزنی نیکل از سختی بالاتری برخوردار بود.

مهمترین نتیجه حاصل از این پژوهش نیز عدم امکان بررسی قابلیت شیشه‌ای شدن در ترکیبات مختلف، تنها با استفاده از روش‌های محاسباتی است. زیرا اطلاعات ورودی در این روش‌ها عمدتاً مبتنی بر نتایج حاصل از پیک‌های موجود در آنالیز حرارتی بخش آمورف نمونه است در حالی که ممکن است در نمونه علاوه بر فاز آمورف، فازهای بلوری نیز وجود داشته باشد. از این رو در کنار انجام بررسی‌های محاسباتی، انجام آزمون‌های تجربی، امری ضروری است.

مراجع

1. Long, Z., Shao, Y., Xie, G., Zhang, P., Shen, B., Inoue, A., "Enhanced soft-magnetic and corrosion properties of Fe-based bulk glassy alloys with improved plasticity through the addition of Cr", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 462, pp. 52–59, (2008).
2. Qiao, D.C., Green, B., Morrison, M., Liaw, P.K., "Electrochemical behavior of a Fe48Cr15Mo14Er2C15B6 bulk metallic glass", Review Advance on Material Science, Vol. 18, pp. 149–153, (2008).
3. Zhang, T., Liu, F., Pang, S., Li, R., "Ductile Fe-based bulk metallic glass with good soft-magnetic properties", *Materials transactions*, Vol. 48, pp. 1157–1160, (2007).

۴. م.حداد, ز.ج., "بررسی اکسایش سطحی نوار بی شکل $Co_{67}Cr7Fe_4Si_8B_{14}$ در طول فرایند بلورینگی", مهندسی متالورژی و مواد, Vol. 24, (1392).

۵. ع.جزایری, ب.ب.ح.ا., "بررســی مکـانیزم تبلور و تـاثیر عملیـات حرارتی بر ســاختـار و خواص مغنـاطیســی نوارهـای آمورف $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$", مهندسی مکانیک, **شماره، ۴۰،(۱۳۸۹).**

6. Guo, S.F., Liu, L., Li, N., Li, Y., "Fe-based bulk metallic glass matrix composite with large plasticity", *Scripta*

Materialia, Vol. 62, pp. 329–332, (2010).

7. Lesz, S., Nowosielski, R., Materials, F., Technologies, P., "Formation and physical properties of Fe-based bulk metallic glasses with Ni addition", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 31, pp. 35–40, (2008).
8. Inoue, A., Kong, F.L., Man, Q.K., Shen, B.L., Li, R.W., Al-marzouki, F., "Development and applications of Fe- and Co-based bulk glassy alloys and their prospects", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 615, pp. 2–8, (2014).
9. Guo, S.F., Li, N., Zhang, C., Liu, L., "Enhancement of plasticity of Fe-based bulk metallic glass by Ni substitution for Fe", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 504, pp. S78–S81, (2010).

[10]Su, C., Chen, Y., Yu, P., Song, M., Chen, W., Guo, S.F., "Linking the thermal characteristics and mechanical properties of Fe-based bulk metallic glasses", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 663, pp. 867–871, (2016).

11. Seifoddini, A., Stoica, M., Nili-Ahmadabadi, M., Heshmati-Manesh, S., Kühn, U., Eckert, J., "New (Fe0.9Ni0.1)77Mo5P9C7.5B1.5 glassy alloys with enhanced glass-forming ability and large compressive strain", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 560, pp. 575–582, (2013).
12. Dai, L.H., Bai, Y.L., "Basic mechanical behaviors and mechanics of shear banding in BMGs", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, pp. 704–716, (2008).
13. Lee, C.J., Huang, J.C., Nieh, T.G., "Sample size effect and microcompression of Mg 65 Cu 25 Gd 10 metallic glass", *Applied Physics Letters*, Vol. 91, pp. 161913, 2007.
14. Chen, Q.J., Fan, H.B., Ye, L., Ringer, S., Sun, J. F., Shen, J., McCartney, D.G., "Enhanced glass forming ability of Fe–Co–Zr–Mo–W–B alloys with Ni addition", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 402, pp. 188–192, (2005).
15. Guo, S.F., Liu, L., Li, N., Li, Y., "Fe-based bulk metallic glass matrix composite with large plasticity", *Scripta Materialia*, Vol. 62, pp. 329–332, 2010.
16. Park, J. M., Wang, G., Li, R., Mattern, N., Eckert, J., Kim, D.H., "Enhancement of plastic deformability in Fe–Ni–Nb–B bulk glassy alloys by controlling the Ni-to-Fe concentration ratio", *Applied Physics Letters*, Vol. 96, pp. 31905, (2010).
17. Eckert, J., Das, J., Kim, K.B., Baier, F., Tang, M.B., Wang, W.H., Zhang, Z.F., "High strength ductile Cu-base metallic glass", *Intermetallics*, Vol. 14, pp. 876–881, (2006).
18. Stoica, M., Eckert, J., Roth, S., Zhang, Z.F., Schultz, L., Wang, W.H., "Mechanical behavior of Fe 65.5 Cr 4 Mo 4 Ga 4 P 12 C 5 B 5.5 bulk metallic glass", *Intermetallics*, Vol. 13, pp. 764–769, (2005).
19. Gu, X.J., McDermott, A.G., Poon, S.J., Shiflet, G.J., "Critical Poisson's ratio for plasticity in Fe–Mo–C–B–Ln bulk amorphous steel", *Applied Physics Letters*, Vol. 88, pp. 211905, (2006).
20. Yao, K.F., Zhang, C.Q., "Fe-based bulk metallic glass with high plasticity", *Applied Physics Letters*, Vol. 90,

pp. 61901, (2007).

21. Yang, W., Liu, H., Zhao, Y., Inoue, A., Jiang, K., Huo, J., Ling, H., Li, Q., et al., "Mechanical properties and structural features of novel Fe-based bulk metallic glasses with unprecedented plasticity", *Scientific reports*, Vol. 4, pp. 6233, (2014).
22. C. Suryanarayana and A. Inoue, Bulk Metallic Glasses. CRC Press, (2011).
23. D. V. Louzguine-Luzgin and A. Inoue, Bulk Metallic Glasses. Formation, Structure, Properties, and Applications., *1st ed.*, *Elsevier B.V.*, vol. 21., (2013).
24. Askari-Paykani, M., Nili-Ahmadabadi, M., Seiffodini, A., "On the subsurface deformation of two different Fe-based bulk metallic glasses indented by Vickers micro hardness", *Intermetallics*, Vol. 46, pp. 118–125, (2014).
25. Seiffodini, A., Zaremehrjardi, S., "Effects of heat treatment on crystallization behavior, microstructure and the resulting microhardness of a (Fe 0.9 Ni 0.1) 77 Mo 5 P 9 C 7.5 B 1.5 bulk metallic glass composite", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 432, pp. 313–318, (2016).
26. Mondal, K., Murty, B.S., "On the parameters to assess the glass forming ability of liquids", *Journal of non-crystalline solids*, Vol. 351, pp. 1366–1371, (2005).
27. Dong, B., Zhou, S., Li, D., Lu, C., Feng, G.U.O., Ni, X., Lu, Z., "A new criterion for predicting glass forming ability of bulk metallic glasses and some critical discussions", *Journal of Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 21, pp. 164–172, (2011).
28. Yuan, Z.-Z., Bao, S.-L., Lu, Y., Zhang, D.-P., Yao, L., "A new criterion for evaluating the glass-forming ability of bulk glass forming alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 459, pp. 251–260, (2008).
29. Inoue, A., "Stabilization of Metallic Supercooled Liquid and Bulk Amorphous Alloy", Acta materialia, Vol. 48, pp. 279–306, (2000).
30. Haratian, S., Haddad-Sabzevar, M., "Thermal stability and non-isothermal crystallization kinetics of Ti41.5Cu42.5Ni7.5Zr2.5Hf5Si1 bulk metallic glass", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 429, pp. 164–170, (2015).
31. Hrubý, A., "Evaluation of glass-forming tendency by means of DTA", *Czechoslovak Journal of Physics*, Vol. 22, pp. 1187–1193, (1972).
32. Kim, J.-H., Park, J.S., Lim, H.K., Kim, W.T., Kim, D.H., "Heating and cooling rate dependence of the parameters representing the glass forming ability in bulk metallic glasses", *Journal of non-crystalline solids*, Vol. 351, pp. 1433–1440, (2005).